

RELACIÓN AGUAS SUPERFICIALES–AGUAS SUBTERRÁNEAS Y RECARGA DEL ACUÍFERO DE LOS SOTOS, DOÑANA, ESPAÑA

Iker Juárez⁽¹⁾⁽²⁾, Emilio Custodio⁽²⁾⁽³⁾, Marisol Manzano⁽⁴⁾ y Horacio Higuera⁽⁴⁾

(1)Amphos21, Barcelona / Santiago de Chile

(2) Dep. Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona

(3) Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona

(4) Dept. de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica, Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena

RESUMEN

La relación aguas superficiales–aguas subterráneas en áreas con niveles freáticos someros requiere un buen conocimiento de la topografía y de las formas en que tiene lugar la recarga y la descarga. Cuando éstas están alteradas por una explotación intensiva del acuífero, lo que se observa puede diferir notablemente del estado natural y de lo que muestran los rasgos residuales del mismo. Tal es la situación en el área de Los Sotos, del Parque Nacional de Doñana (Huelva), donde la relación aguas superficiales–aguas subterráneas está alterada, no sólo por extracciones de agua subterránea profunda para riego en áreas próximas, sino también por los excedentes de riego que se generan y la red de canalizaciones para gestionar dichos excedentes, y a causa de grandes cambios en la cobertura vegetal. La evaluación de la recarga local lleva a valores medios en torno a 150 mm/a. La modelación del flujo del agua subterránea incluye relaciones variables entre los arroyos y el nivel freático. Se ha abordado en estado estacionario para delimitar los rasgos dominantes del funcionamiento de los arroyos con respecto al nivel freático y los cambios respecto a la situación natural.

Palabras clave: Doñana 2005, modelación, relación humedales–arroyo–acuífero, cambios antrópicos.

1. INTRODUCCIÓN

El Parque Nacional de Doñana está situado en el Bajo Guadalquivir, en las provincias de Sevilla y Huelva. A grandes rasgos consiste en una extensa marisma temporal y un entorno arenoso que contiene un importante sistema acuífero libre, que limita con la marisma a lo largo de un ecotono (La Vera), el mar y un arroyo principal, La Rocina, que el sector oeste drena hacia la marisma (Fig. 1).



Figura 1. Localización del área de Los Sotos en Doñana (recuadro) y toponimia en el entorno del área; el borde de las marismas del Guadalquivir es el ecotono de La Vera. En el lado izquierdo se sitúa el área agrícola regada. Se resalta el sistema de drenaje de la finca Cortijo de Los Mimbrales.

El Parque nacional de Doñana sufre presiones debidas a la población del entorno y en especial a las áreas agrícolas próximas, regadas con aguas extraídas localmente del Sistema Acuífero de Doñana. Se han realizado numerosos intentos para tratar de reducir los impactos humanos y corregirlos, como el reciente el Proyecto Doñana 2005, por parte del Ministerio de Medio Ambiente que, aunque dominante dedicado a las aguas superficiales, incluía algunas acciones dirigidas a las aguas subterráneas, entre ellas la que es objeto de esta comunicación. Se trata de la mejora de los sistemas de drenaje de los cultivos de la finca Cortijo de los Mimbrales, en la zona S del tramo final del arroyo de la Rocina.

Las correcciones hacen referencia a los procesos de erosión, transporte y sedimentación a lo largo de la red de drenaje superficial, y a la contaminación agrícola debida al uso de fertilizantes. Se construyó un canal de hormigón en sentido W-E (Canal de los Mimbrales), que cruza parte del Parque hasta desembocar en la Marisma de El Rocío, para recoger las escorrentías pluviales y los excedentes de riego, junto a las aguas de descarga del acuífero en época húmeda. Se modificaron los cauces naturales de los arroyos de Soto Chico y Soto Grande con la creación de dos balsas de retención de agua para laminar los caudales punta y retener los sólidos, además de actuar como filtros verdes para metabolizar los contaminantes agrícolas. Estas balsas se conectan al tramo final de los cauces naturales de esos arroyos.

La introducción de especies freatófitas no autóctonas (eucaliptus) a finales de la década de 1940 para su uso en la industria papelera, capaces de evapotranspirar todo el año, deprimen los niveles freáticos. En la década de 1990 han sido erradicados y eso también ha generado afecciones al medio. Una de esas áreas fue la de Los Sotos.

El área aquí considerada, Los Sotos, se sitúa en la zona de arroyos vertientes a La Vera, al S de la población del Rocío. Por ella fluyen de los excedentes de riego de los cultivos situados al sur del tramo inferior del arroyo de la Rocina, que es una importante zona agrícola regada con aguas subterráneas locales, que incluye la extensa finca Cortijo de los Mimbrales, y forma su límite W. Existen 3 arroyos principales que de N a S son: Caño de Los Mimbrales, arroyo de Soto Chico y arroyo de Soto Grande, con una longitud funcional actual en torno a los 2 km, aunque existen evidencias visibles de una notablemente mayor extensión en épocas anteriores (Castroviejo, 1993).

Para encuadrar la problemática local en un entorno más amplio, se considera el área al este del La Vera, hasta El Abalarío, en el centro del sector W, estudiadas recientemente desde el punto de vista hidrogeológico por Trick (1998), Iglesias (1999) y Lozano (2004), entre otros. En Custodio *et al.* (2009) se reúnen muchos de los resultados. El área de detalle se ha estudiado en Juárez (2010), que es el trabajo base para esta comunicación.

El área está afectada por el incremento de las extracciones de agua subterránea profunda, lo que ha ido provocando una disminución del agua presente en los arroyos y caños de algunas zonas, procedentes del drenaje del acuífero freático, con lo que han decrecido los aportes al arroyo de La Rocina y a la Marisma. En áreas próximas a la zona regable, los caudales de los arroyos se han visto substituidas temporalmente por el agua de drenaje de los excedentes de riego.

Aquí se analizan los impactos sobre el nivel freático en el área de Los Sotos y su entorno, derivados de las acciones humanas recientes llevadas a cabo. Esto se hace mediante modelación matemática del acuífero, en régimen estacionario, de cada una de las principales modificaciones realizadas.

Existen notables cambios estaciones e interanuales, con notables diferencias entre épocas secas y húmedas (Fig. 2), en especial en cuanto a la existencia de arroyos y lagunas. Estrictamente no es posible definir con detalle un estado medio representativo, pero no obstante se hace a efectos comparativos de los cambios, sin que necesariamente representen la situación en una estación o un año determinado.

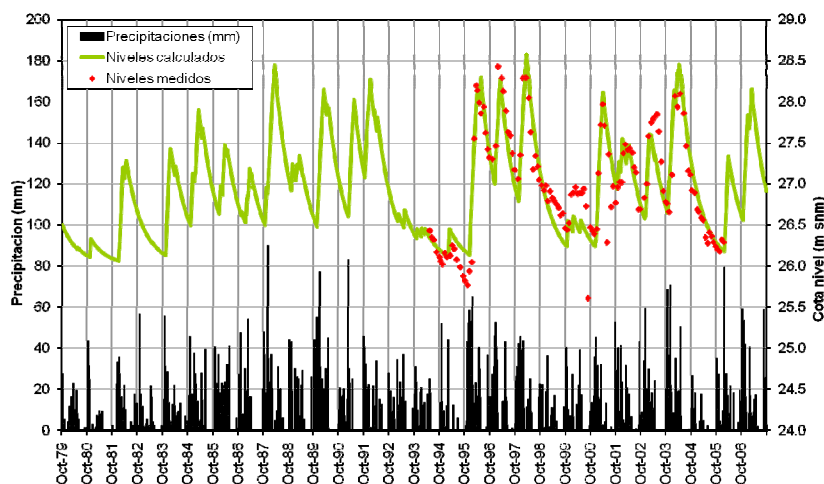


Figura 2. Ejemplo de evolución piezométrica poco profunda en el emplazamiento Casa de la Mogeja, al sur de Los Sotos, y de la precipitación mensual en el Palacio de Doñana, y ajuste de los niveles con la recarga diaria calculada (Juárez, 2010). El área es de matorral de monte blanco.

2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE LOS SOTOS

Los alcornoques, acebuches, sabinas y enebros formaban parte de los bosques de Doñana, pero actualmente dominan las coníferas, matorral mediterráneo, pinares de repoblación y eucaliptus. El matorral de monte negro (brezal hidrófilo y aulagar) se asocia a zonas donde el nivel freático se encuentra próximo a la superficie, y el matorral de monte blanco (brezal xerófilo y jaguarzal) corresponde a zonas de duna y planicies interdunares con el nivel freático más profundo.

Los niveles freáticos están muy próximos a la superficie del terreno, aunque varían según la morfología y el momento, y resultan en numerosas manifestaciones del agua subterránea en las depresiones del terreno, en forma de lagunas, arroyos y caños hacia la marisma y el arroyo de La Rocina. También se produce descarga difusa y semidifusa de agua subterránea en el ecotono de La Vera, que se manifiesta en concentraciones de vegetación freatofítica y extensas zonas de pastizal en el borde de la marisma, y al mar, y por evapotranspiración freática donde los niveles son poco profundos.

Hidrológicamente cabe distinguir dos subniveles acuíferos relacionados, el superior, predominantemente de arenas finas o medias, de 15 a 35 m de espesor, que contiene el nivel freático, y otro inferior, heterogéneo, de arenas medias y gruesas y gravas, que es el más explotado; entre ambos puede aparecer una formación de arcillas grises, plásticas, a modo de acuitardo, que en el área de Los Sotos tiene pocos metros de espesor. Además existe un nivel paleoedáfico somero menos permeable, que no impide la recarga pero que favorece la formación de niveles temporales semicolgados y la descarga temporal a arroyos.

El aumento de los bombeos profundos, fundamentalmente para riego, produce un notable descenso de los niveles piezométricos, lo que se traduce en un descenso freático, que se manifiesta de forma diferida (Custodio *et al.*, 2009). El área de Los Sotos se encuentra muy próxima a los cultivos de la parte Sur de La Rocina, por lo que sufre notables afecciones freáticas y piezométricas, con acortamiento de algunos cauces y cambio en el régimen de caudales, aunque es mal conocido.

El área de Los Sotos ha sido una de las áreas afectadas por la plantación de bosques de eucalipto, y luego por su erradicación.

3. ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS EN EL ÁREA DE LOS SOTOS

Se consideran las siguientes situaciones para caracterizar los cambios medios que así se evalúan:

1. Nat. Estado natural, que es la referencia de partida. Las primeras observaciones, escasas, corresponden al inicio de las explotaciones de agua subterránea.
2. Euc. Efecto de la mayor evapotranspiración por introducción del bosque de eucalipto.
3. Q + Euc. Efecto de las extracciones de agua subterránea, principalmente en el área límite al W del área de Los Sotos entre El Rocío-La Rocina y El Acebuche ($23 \text{ hm}^3/\text{a}$) y para la urbanización de Matalascañas ($1 \text{ hm}^3/\text{a}$), con los bosques de eucalipto.
4. Q – Euc. Efecto de la erradicación de los bosques de eucalipto de Los Sotos, manteniendo las extracciones de agua subterránea.
5. Q – Euc + M. Efecto de la gestión de los efluentes agrícolas y de escorrentía.

La topografía disponible no tiene detalle suficiente en puntos críticos, ni para establecer bien las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas ni en cuanto a la profundidad de nivel freático y sus variaciones. Para paliarlo, la Universidad Politécnica de Cartagena hizo relevamientos topográficos e instaló y observó 68 freatómetros que complementan la excelente y extensa red piezométrica de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHGQ).

Para evaluar la recarga local se ha realizado un balance diario de agua de lluvia en el suelo, con ayuda del código VISUAL BALAN (V2.0) (Samper *et al.*, 1999), con datos de 36 años de la estación meteorológica del Palacio de Doñana y calibración mediante una serie de 12 años de niveles piezométricos someros, y que se suponen representativos de los freáticos (ver figura 2).

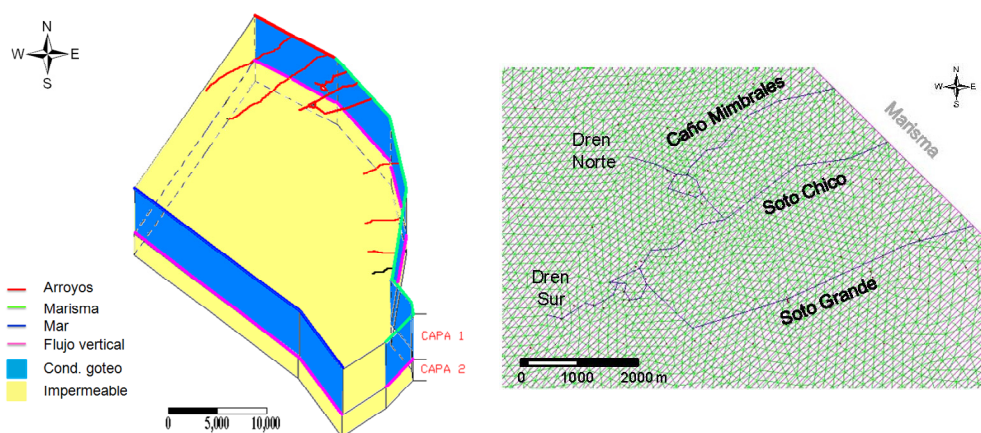


Figura 3. Croquis esquemático del modelo extendido, con su estructura en capas, los contornos y los arroyos considerados, y detalle de la malla en el área de los Cotos (Juárez, 2010).

El modelo hidrogeológico conceptual adoptado es el que corresponde a un acuífero único dividido en dos capas, una superior menos permeable y otra inferior más permeable, y con una intercalación semipermeable continua, a modo de acuitardo (Fig. 3). En las áreas más altas el flujo del agua subterránea somera es lateral hacia los rasgos superficiales y vertical hacia la capa profunda, mientras que en las áreas bajas periféricas esta capa profunda descarga verticalmente hacia arriba y puede ser surgente. En estado natural la mayor parte del flujo subterráneo se produce por la parte menos profunda del acuífero, con numerosas salidas a lagunas, arroyos y caños. La extracción de agua subterránea se aplica a la capa profunda. Además se considera el efecto de evapotranspiración freática de los bosques de eucaliptus hasta completar su demanda potencial, suponiendo que sólo lo hacen cuando hay déficit de humedad en el suelo.

4. MODELIZACIÓN DE LOS CAMBIOS

Se dispone de varios modelos numéricos de simulación del flujo del agua subterránea en régimen transitorio de todo el sistema acuífero de Doñana, con especial referencia al que hizo la UPC para la CHGQ (Castro, 1999), ya que utiliza el mismo código que aquí se considera, que es Visual TRANSIN (v86), de elementos finitos, interfaz gráfica del código TRANSIN-IV, que es una actualización y extensión del código TRANSIN-III (Galarza *et al.*, 1995).

Se ha modelizado el área a dos escalas: a) escala extendida, de una parte del acuífero, de la misma manera que lo hizo Lozano (2004), con un área de 380 km² entre La Rocina y el mar, y entre La Vera y el centro del área occidental que proporciona el marco general de referencia y b) escala local, en el área de Los

Sotos, como detalle. En ambos casos se consideran las dos capas acuíferas y la existencia de un acuitardo intercalado. Los parámetros se han obtenido de los trabajos y modelos anteriores, adecuándolos a la escala local, y se exponen en Juárez (2010). El modelo se ha sido discretizado teniendo en cuenta el diferente interés de las áreas estudiadas y sus resultados. Se parte de un tamaño de elemento de 100 m en el área de Los Sotos y luego se va aumentando hasta 1000 m en áreas lejanas. También se ha realizado una zonificación en 12 zonas, repartidas en las 3 capas en que se estructura el modelo.

Dada la falta general de datos sobre las acciones temporales, los caudales de arroyos y la extensión de lagunas, la modelización se ha realizado en estado (pseudo-) estacionario. Con ello se obtienen valores medios multianuales, sólo válidos a nivel comparativo. El estado reflejado es el final a que se tiende en un sistema con notable inercia, con un tiempo de semi-cambio de alrededor de 30 años (Lozano, 2004), y por lo tanto las modificaciones observadas a causa de acciones recientes pueden ser menores.

Se ha estimado el área ocupada por las diferentes especies vegetales y se han representados los cauces que se ha creído más importantes y de mayor extensión. La cartografía de Castroviejo (1993) ha orientado sobre la extensión natural de los arroyos. En el desarrollo del modelo se ha ido incrementando el número de arroyos considerados para justificar los niveles registrados, hasta conseguir unos resultados aceptables.

Los cauces (arroyos y caños) principales que se han considerado son:

1. Arroyo de La Rocina (parte inferior), aproximadamente 5 km, hasta su desembocadura,
2. Arroyo de Bernabé, con distintas longitudes según el caso; vierte a La Rocina,
3. Arroyo de la Zorra, que atraviesa las zonas de cultivos actuales; vierte a La Rocina,
4. Arroyo del Caño de Mimbrales, modificado para realizar el drenaje; vierte a la marisma,
5. Arroyo de Soto Chico; en su trazado actual parte de la balsa N de retención y el resto en estado relativamente natural; vierte a la marisma,
6. Arroyo de Soto Grande, el de mayor longitud y más funcional; vierte a la marisma,
7. Caños de La Vera: se han incluido 4; vierten a la marisma.

No ha sido representado un mayor número de arroyos puesto que están fuera de la zona de interés y su consideración supone una excesiva complicación de la geometría del modelo.

En el contacto con la marisma se ha fijado como una condición de contorno de goteo, con la cota aproximada de la descarga subterránea. A lo largo del calibrado ha tenido que ser corregida ya que es un área de límites poco definidos y

fluctuante a lo largo del año. La condición de contorno de los arroyos y de los cuerpos lagunares y balsas se ha establecido calculando un goteo lineal en función de la diferencia entre el nivel freático y la cota aproximada de la lámina de agua, en la orilla para las balsas.

La posibilidad de tratar de forma sencilla la relación acuífero–arroyo ha jugado un papel muy importante en la decisión de limitar el estudio al estado estacionario. Su longitud activa es muy variable, no solo con la época sino con el escenario. El *modus operandi* adoptado ha sido analizar el balance de agua de los diferentes cuerpos de agua en relación el nivel freático simulado. Si los niveles freáticos son más altos que los del cauce efectivo de un arroyo considerado seco, se modifica la condición de contorno mediante la conexión de progresivos nodos hasta establecer un equilibrio. Si los niveles freáticos son inferiores a los del cauce efectivo de un arroyo con agua y sin aportes que lo justifiquen, se procede la eliminación progresiva de modos conectados. Los reajustes de la geometría del modelo son tediosos y por eso sólo se realizan cuando los caudales intercambiados anómalos tienen un peso importante en el funcionamiento conjunto. Sólo tienen aporte externo de agua el arroyo de La Rocina, que tiene una gran cuenca superior, el Caño de Mimbrales y los arroyos de Soto Chico y Soto Grande cuando reciben agua de drenaje del área agrícola, y ocasionalmente otros arroyos cuando reciben aportes de agua subterránea aguas arriba.

5. RESULTADOS

Los resultados calibrados de la recarga media en Los Sotos se dan en la Tabla 1, con la incertidumbre asociada a los parámetros y al hecho de que la estación pluviométrica no coincide con la ubicación de los puntos de medida del nivel freático (heterogeneidad espacial de los eventos de lluvia) y que el nivel freático puede diferir algo de los niveles piezométricos en sondeos poco profundos a causa de la capa somera poco permeable. El valor medio de cerca de 150 mm/a es similar al que se obtiene por balance de la deposición atmosférica de CI (Custodio 2010). Es razonable suponer una desviación típica de 30 mm/a, pero aún no ha sido cuantificada.

	Precipitación	Evapotranspiración potencial	Interceptación	Escorrentía superficial	Evapotranspiración real	Recarga al acuífero
mm/año	546	797	56	37	305	148
%P	100	146	10	7	56	27

Tabla 1. Resumen del balance hídrico realizado para el cálculo de la recarga al acuífero (cifras redondeadas). Valores medios multianuales y % de la precipitación media P.

En la tabla 2 se dan los caudales de descarga del acuífero a las aguas subterráneas en los diferentes escenarios considerados. Algunos resultados son inciertos o pueden contener ciertas desviaciones a causa de efectos de proximidad a los contornos o no estar éstos bien definidos. Hay arroyos que se secan

totalmente y otros sólo parcialmente, dependiendo del escenario, unas veces en su parte central y otras en su parte final, según proximidad a la fuente de impacto (Fig. 4).

6. CONCLUSIONES

El área de Los Sotos, parte NE del sector occidental de Doñana, actualmente dentro del Parque Nacional de Doñana, ha sufrido notables cambios, que se han podido simular en primera aproximación en cuanto a los efectos medios a largo plazo. El acuífero recibe una recarga media próxima a 150 mm/a, que mantiene un nivel freático alto, próximo a la superficie del terreno. En estado natural se originan una serie de importantes arroyos permanentes que descargan a La Rocina y a la marisma, y una notable descarga semidifusa a la marisma. No se originan cuerpos lagunares locales. La plantación de bosques de eucalipto en Los Sotos tuvo un moderado impacto en el área de La Rocina, importante en Los Sotos y moderado en los Caños de la Vera. Los bombeos, principalmente agrícolas, seriamente impactan la zona a gran escala y afectan a todos los arroyos, que en gran manera se secan parcial o totalmente, aunque afectan moderadamente a la descarga semidifusa a La Vera. La erradicación del eucalipto, manteniendo los bombeos, supone una cierta mejora moderada en La Rocina, más acusada en Los Sotos, donde el arroyo de Soto Grande vuelve a ser parcialmente operativo, y notable en los Caños de La Vera, en especial en los más al N. La gestión de los drenajes de la finca Cortijo de Mimbrales para su regularización en balsas y facilitar su recarga por infiltración produce una mejora en La Rocina y notable en el arroyo de Soto Grande, pero mejora poco las condiciones de los Caños de La Vera y la Vera.

Cuerpo de agua	Escenario					(A)
	Nat	Euc	Q + Euc.	Q – Euc.	Q – Euc + M.	
Mar	32800	32700	26500	26800	27200	
Arroyo de La Rocina	7800	7520	-2700	-1870	-490	(1)
Arroyo de Bernabé	560	867	0	0	0	(2)
Arroyo de la Zorra	11160	9831	-740	-170	130	(3)
Caño de Los Mimbrales	350	0	0	-127	70	(4)
Soto Chico	780	-1300	-3220	-570	760	(5)
Soto Grande	4320	510	-3190	140	2890	(6)
4 Caños de La Vera	4920	2840	940	3280	3820	(7)
Difusa al ecotono	32800	32700	26500	26800	27200	

Tabla 2. Resultados de las modelaciones para los diferentes escenarios considerados. Descargas del acuífero a los cuerpos de agua superficial, en m³/d. los valores negativos son recargas. A.– Nat = estado seminatural; Euc = introducción de eucalipto; Q + Euc = bombeos + eucalipto; Q – Euc = bombeo con eucalipto erradicados. Ascenso freático de ~1 m; Q – Euc + M = bombeo con eucalipto erradicados y recarga en drenajes agrícolas; (1).– Tiene posibles aportes de aguas arriba y puede recargar; (2).– Se seca parcial o totalmente y no recupera; (3).– Se seca, en especial en su tramo final, y es posible que recupere al final; (4).– Se seca y a efectos prácticos no recupera; (5).– Se seca, sin poder ajustar bien la condición de contorno en La Vera; al final recupera; (6).– Id (5). Recorrido natural de 6 km, que se reduce luego; (7).– El más al N se seca, y al final recupera, pero los otros se mantienen.

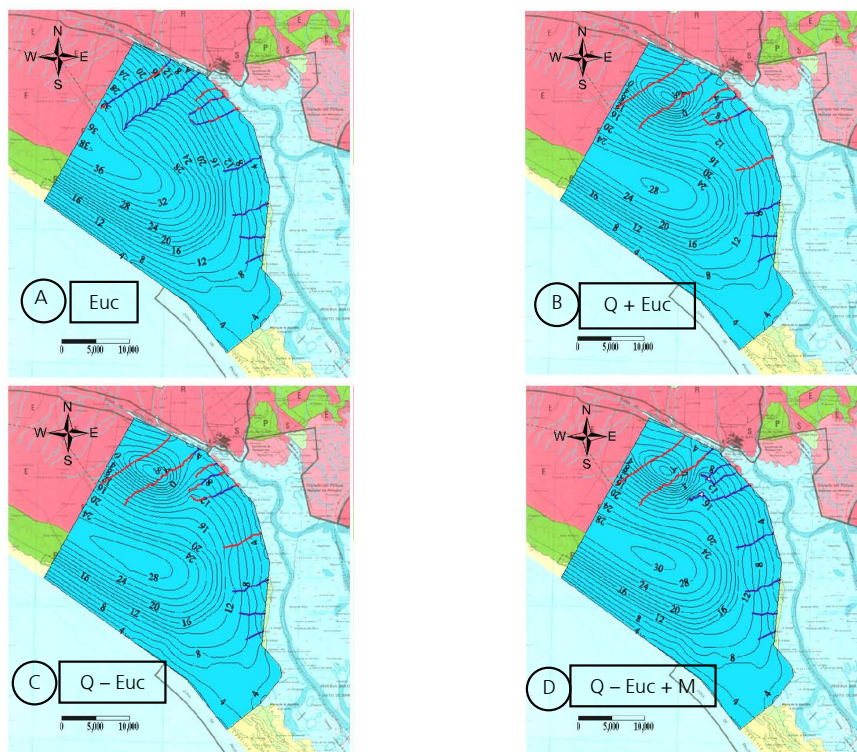


Figura 4. Piezometría estacionaria simulada del nivel superior (similar al nivel freático) y longitud de los arroyos activos (negro) y no activos (rojo), que se han suprimido como condición de contorno, para los escenarios: A) Euc; B) Q + Euc; C) Q – Euc y D) Q – Euc + M (modificado de Juárez, 2010).

Reconocimientos

El presente trabajo se ha preparado dentro del proyecto REDESAC (CICYT, CGL 2009–12910–C03–01).

REFERENCIAS

- Castro, A. (1999). *Modelo regional de flujo subterráneo del sistema acuífero Almonte–Marismas y su entorno*. Tesis de Máster en Hidrología Subterránea. UPC–FCIHS. 1–134 pp + Anejos.
- Castroviejo, J. (1993). *Memoria. Mapa del Parque Nacional de Doñana*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas / Agencia de Medio Ambiente, Junta de Andalucía: 1–133.
- Custodio, E. (2010). Recarga a los acuíferos extensos a partir de la deposición atmosférica de cloruros y de la temperatura del terreno. *Boletín Geológico y Minero*, 120(4): 631–640.

- Custodio, E., Manzano, M. y Montes, C. (2009). *Las aguas subterráneas en Doñana: aspectos ecológicos y sociales*. Agencia Andaluza del Agua, Consejería de Medio Ambiente. Sevilla: 1–243.
- Galarza, G., Medina, A. y Carrera, J. (1996). *TRANSIN III: Fortran code for solving the coupled non-linear flow and transport inverse problem*. ETSECCPB, UPC. El Berrocal Project, Topical Report 17. ENRESA.
- Iglesias, M. (1999). *Caracterización hidrogeoquímica del flujo del agua subterránea en El Abalario, Doñana, Huelva*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona: 1–254.
- Juárez, J. (2010). *Aguas subterráneas en La Vera–Los Mimbrales y su relación con los arroyos y lagunas. Parque Nacional de Doñana (Huelva)*. Tesina de Máster, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona: 1–115.
- Lozano, E. (2004). *Las aguas subterráneas en los Cotos de Doñana y su influencia en las lagunas*. Tesis Doctoral. Dpto. de Ingeniería del Terreno y Cartografía. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Samper, J., Huguet, Ll., García, M.A. y Arés, J. (1999). *Manual del usuario del programa VISUAL BALAN V.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga*. ENRESA. Universidad de A Coruña: 1–124.
- Trick, Th. (1998). *Impacto de las extracciones de agua subterránea en Doñana: aplicación de un modelo numérico con consideración de la variabilidad de la recarga*. Tesis Doctoral. ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya: 1–277 + Anejos.